干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

中国天山积雪垂直分布异质性研究

张　博[1,2,3]，　李雪梅[1,2,3]，　秦启勇[1,2,3]，　李　超[1,2,3]，　孙天瑶[1,2,3]

（1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃 兰州　730070；2. 甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃 兰州　730070；3. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃 兰州　730070）

摘　要： 基于2001—2018年MOD10A2积雪产品和MOD11A2陆地表面温度数据，采用精细分区统计和相关性分析方法，研究了中国天山不同海拔高度上积雪垂直分布特征及其与地表温度（Land surface temperature，LST）的响应关系。结果表明：中国天山积雪覆盖率（Snow cover percentage，SCP）随海拔的变化呈现春、夏、秋、冬4种不同的季节变化模式。SCP在海拔4200 m以下呈秋冬季增加、春夏季减少态势，在海拔4200 m以上呈秋冬季减少、春夏季增加态势。除冬季外，春、夏、秋3个季节的SCP与LST均具有显著强负相关性。

关 键 词： 积雪覆盖率；地表温度；垂直分布；中国天山

文章编号：

积雪是冰冻圈中较为活跃的因子[1]，不仅影响地球表面辐射能量和水分平衡，而且是大气环流、径流模型、天气预报以及气候变化研究的关键要素之一[2]。研究积雪变化对于气候变化、天气预报及水资源的管理和再分配至关重要。中国天山是我国三大稳定积雪区之一[3]，作为中亚地区的水塔和重要的生态屏障[4]，其山区融雪径流产生的春汛对下游的农业灌溉极其重要[5]。因此，准确地监测中国天山积雪变化对当地人民的生产生活、区域气候环境变化及水文循环意义重大。

在全球气候变暖的形势下，高寒地区积雪垂直分布引起了诸多学者的关注。Tang等[6]发现青藏高原海拔5500 m以上区域全年积雪覆盖率（Snow cover percentage，SCP）均高于30%，且高海拔地区全年天山SCP的相对最小值出现在冬季。除多等[7]对西藏高原积雪时空分布进行了分析，发现海拔4000 m以下年内SCP随时间变化呈单峰型分布，海拔越高单峰型越明显，而海拔4000 m以上则为双峰型，且年内SCP最低值在海拔6000 m以下出现在夏季，在6000 m以上则出现在冬季。陈文倩等[8]采用MODIS积雪数据与气象站点数据对亚洲中部干旱区不同高程带上积雪面积变化规律进行了分析，发现SCP随季节变化在海拔1000 m以下呈U型曲线，在1000~4000 m区域呈V型曲线。卫仁娟等[9]基于2001—2016年MOD10A2数据分析了新疆叶尔羌河流域不同高程带上积雪面积年内及年际变化规律，发现海拔6000 m以下SCP年际变化曲线呈下降趋势；海拔6000 m以上SCP年际变化不大，呈微弱增加趋势。何海迪等[10]利用2001—2015年MOD10A2积雪产品和气象数据，发现中国天山海拔1500 m以下区域SCP低于10%，海拔4500 m以上区域平均SCP可达70%。秦艳等[11]采用2001—2015年MODIS积雪数据、陆表温度数据和中国高时空分辨率降水数据对中国天山积雪时空变化进行了分析，发现中国天山全区积雪面积呈略微减少趋势，其中秋季略微增加，春季变化不大，冬季和夏季明显减少。综上所述，不同海拔尺度上，SCP的垂直变化异质性大，同时不难发现前人多采用MODIS积雪产品与气象站点资料相结合在较大的海拔范围（1000~4000 m的海拔间隔）上研究积雪垂直变化，较少考虑将海拔高度进行精细划分，从更小的尺度（1000 m及以下海拔间隔）上研究积雪垂直分布的空间异

收稿日期： 2021-09-13；　**修订日期：** 2021-11-08

基金项目： 国家自然科学基金项目（41761014）；兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”；兰州交通大学优秀平台支持（201806）资助

作者简介： 张博（1996-），男，硕士研究生，主要从事积雪遥感研究. E-mail: 18235118550@163.com

通讯作者： 李雪梅（1983-），女，副教授，主要从事气候变化和积雪遥感研究. E-mail: lixuemei@lzjtu.edu.cn

质性及其对气候因子的响应。由于中国天山气象站点稀缺且大多分布于低海拔区域，实测站点资料的局限性给积雪变化的研究带来了很大的不确定性。而MOD11A2可以提供长时间序列温度分布[12]，其精度已经得到广泛验证，大量学者已应用于温度时空变化研究[13-14]，为缺资料的山区积雪分布格局及气候响应研究提供数据支撑。

在融雪径流模拟和气候变化对积雪影响更精准的评估中，积雪更小尺度上的垂直性变化是一个必不可少的考虑因素，因此从更精细的海拔尺度上开展中国天山积雪垂直变化与温度变化的时空相关性研究十分必要。中国天山山区存在着显著的变暖趋势，且增暖幅度明显高于全国平均水平[15]。故本文以气候快速增暖的中国天山为研究区，采用MODIS积雪产品(MOD10A2)和地表温度产品(MOD11A2)，结合部分站点实测资料，通过将中国天山海拔范围精细划分为一系列海拔带的方法，对整个中国天山进行精细分区统计分析，从较小的尺度上研究积雪的垂直分布异质性及其与地表温度(Land surface temperature，LST)的协同关系，以期为中国天山积雪资源的精细化利用及精准化灾害防治等提供理论依据。

1　研究区、数据与方法

1.1　研究区概况

我国境内的天山(中国天山)位于整个山系的东部，全长1700 km，山脊线平均高度为4000 m(图1)。山间盆地和纵向谷地相间，西段构造强烈上升，地势高峻，由此向东，地势有所降低，最东段山势迅速降低，逐渐淹没在戈壁之中[16]。中国天山以典型的温带大陆性干旱和半干旱气候为主[17]，且是南北疆的气候过渡带[18]，由于受西风环流和独特地形的影响[19]，中国天山东部和南部降水稀少，年均降水量约为200 mm，伊犁河谷上游是中国天山的最大降水中心，年降水量高达500~800 mm[20]。中国天山海拔4000 m以上冰川与冻土分布广泛，丰富的雪冰资源成为新疆河川径流的重要供给来源[11]。

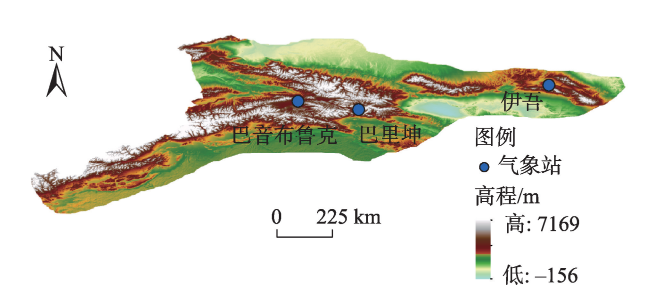


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

1.2　数据来源

使用美国国家冰雪数据中心(NSIDC，http://nsidc.org/nasa/MODIS)的MOD10A2，时间分辨率为8 d，空间分辨率为500 m。相关研究表明MOD10A2在新疆区域的积雪识别精度为87.5%~94.0%[21-22]，能较好地反映中国天山积雪时空分布特征[11,23]。研究区的范围由4幅图像拼接而成，分别是h23v04、h23v05、h24v04和h24v05。

数字高程模型(DEM)来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)提供的90 m分辨率的SRTM数据集。

采用中国气象数据官网(http://cdc.cma.gov.cn)3个气象站2001—2018年的日平均气温资料验证MOD11A2在研究区的适用性，信息详见表1。

表1　气象站点信息

Tab. 1　Information of meteorological stations

站点编号	站点名称	经度/E	纬度/N	海拔/m
51542	巴音布鲁克	84°05′24″	43°01′12″	2458.0
52101	巴里坤	93°01′48″	43°21′36″	1677.2
52118	伊吾	94°25′12″	43°07′49″	1728.6

地表温度资料选用美国NASA数据在线网站(https://earthdata.nasa.gov/)的地表温度产品MOD-11A2，空间分辨率为1 km。为与积雪数据相匹配，对白天和夜间2个数据集求平均值得到18 a来中国天山8 d平均LST，并重采样至500 m分辨率。为验证MOD11A2对研究区的适用性，对巴音布鲁克、巴里坤和伊吾3个气象站LST与站点实测气温(共2484对数据)进行回归分析，结果显示相关系数均大于0.95(表2)，这表明MOD11A2完全可以满足本研究的需要。

1.3　研究方法

(1) 积雪指数

积雪覆盖率(SCP，%)表示积雪覆盖面积占研究区总面积比百分率[11]。计算公式如下：

$$SCP = \frac{S_s}{S} \times 100\% \tag{1}$$

式中：S_s为统计区域内的积雪覆盖面积(m²)；S为研

表2　2001—2018年气象站实测气温和地表温度(LST)精度验证结果

Tab. 2　Accuracy verification results of measured air temperature and LST data from 2001 to 2018

站点名称	相关系数(r)	决定系数(R^2)	均方根误差(RMSE)/℃
巴音布鲁克	0.958	0.918	5.3
巴里坤	0.968	0.937	4.7
伊吾	0.978	0.956	3.5

究区总面积(m^2)。

(2) 分区统计方法

为研究积雪覆盖的海拔差异性,根据中国天山山区的地形特点将海拔按照200 m间隔进行分带处理。为比较不同海拔带上的变化特征,将中国天山划分为6个不同海拔分区:A区(海拔≤1000 m)、B区(海拔1000~2000 m)、C区(海拔2000~3200 m)、D区(海拔3200~4200 m)、E区(海拔4200~5000 m)和F区(海拔≥5000 m)。

2　结果与分析

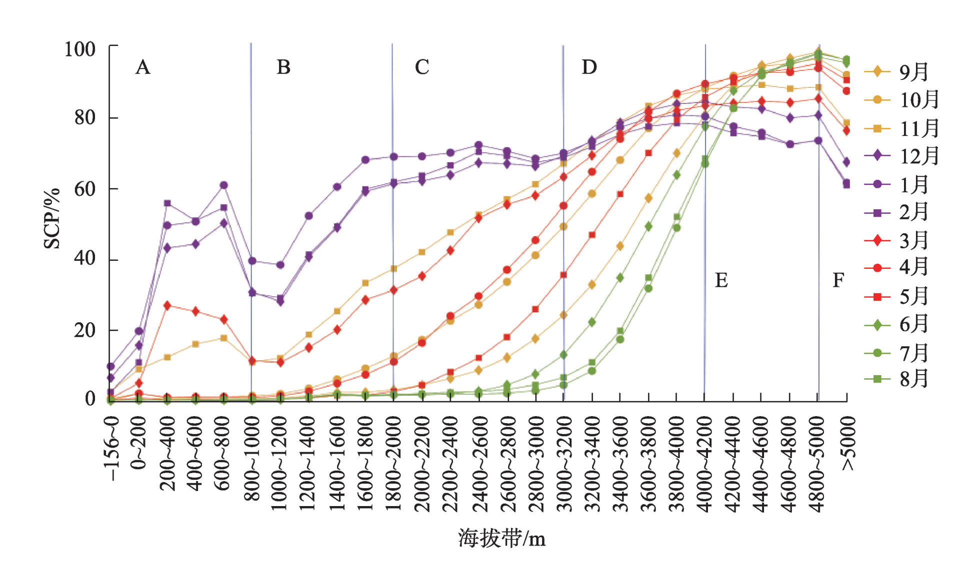
2.1　中国天山SCP时空变化特征

2.1.1　*不同月份SCP的垂直分布格局*　图2显示不同海拔带上各月SCP的变化情况,SCP来自于2001—2018年各月每8 d合成的SCP加权平均值,其权重由积雪数据在该月的跨度天数决定。SCP随海拔的变化分别记为模式Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ。

模式Ⅰ代表12月—次年2月(冬季)SCP随海拔的变化。A区的SCP由低海拔的6%左右上升至60%左右,在海拔600 m以上开始下降,迅速降到30%左右。B区的SCP处于较快上升状态,由30%~40%上升至60%~70%。C区的SCP基本无变化,积雪覆盖了该海拔带60%~70%的面积。D区的SCP平缓上升至80%~90%,达到冬季最高峰,而E区的SCP开始逐渐下降,降至60%左右。

模式Ⅱ代表3—5月(春季)SCP随海拔的变化。在A区,3月的SCP急剧上升至30%随后下降至10%左右,4月和5月的SCP维持在1%左右。在B区,3月和4月的SCP保持相同的速率持续上升,3月上升至30%左右,4月上升至10%左右。在C区,3—5月的SCP均保持相同的走势,3月从30%上升至60%,4月从10%上升至55%左右,5月从2%上升至35%左右。在D区,3月和4月的SCP上升趋势随海拔升高逐渐降低,5月的SCP急剧上升,自35%上升至85%左右。在E区,3—5月均表现出平缓上升的共同特征,在4800~5000 m达到最高值。越过5000 m(F区),3—5月的SCP均开始下降。

模式Ⅲ代表9—11月(秋季)SCP随海拔的变化。在A区,11月的SCP出现明显上升趋势,在600~800 m处上升至18%左右,随后下降到10%左右,9月和10月的SCP一直保持最低状态不变。在B区,11月的SCP上升速率逐渐加快,跨越C、D和E



注:将中国天山划分为6个不同海拔分区:A区(海拔≤1000 m)、B区(海拔1000~2000 m)、C区(海拔2000~3200 m)、D区(海拔3200~4200 m)、E区(海拔4200~5000 m)和F区(海拔≥5000 m)。下同。

图2　中国天山月平均积雪覆盖率(SCP)垂直分布

Fig. 2　Vertical distribution of monthly mean snow cover percentage (SCP) in Chinese Tianshan Mountains

区保持较高上升速率，在4800~5000 m达到最高(99%左右)，随后在F区逐渐下降至93%左右。9月和10月SCP的上升趋势保持相同的规律，即在A区没有上升趋势，在B~D区共同保持快速上升模式，在E区上升速率逐渐降低，随后平缓上升至最高值，在4800~5000 m间开始下降。

模式Ⅳ代表6—8月(夏季)SCP随海拔的变化。6—8月的SCP在A区和B区没有出现明显上升态势，在C区开始上升，并保持相同的上升速率持续上升，在E区达到峰值，随后开始下降。

2.1.2　不同海拔分区SCP年内变化态势　图3为2001—2018年不同海拔分区SCP的年内变化情况。A区和B区的SCP变化态势相同，从9月下旬开始上升，到12月底达到峰值(A区峰值为43%左右，B区峰值为63%左右)，12月底后积雪开始急剧消融，至4月中旬SCP降至最低值，随后保持不变，稳定在1%左右。C区的SCP明显大于A区和B区2个低海拔区域，自8月的5%左右逐步上升至11月中旬的60%左右，随后在11月—次年2月期间平缓上升达到最高值70%，在2月中旬开始急剧下降，至6月初开始逐渐趋于最低值2%。D区全年SCP均在30%以上，该区SCP从8—10月一直处于上升态势，10月—次年4月一直处于平稳状态，保持在80%左右；该分区SCP低值时段位于7月末—8月初，原因是该地区8月温度较高，位于0 ℃以上，在此期间发生了积雪消融。E区和F区的共同特征是在8—10月SCP稳定在90%以上，最大值均出现在7—8月，10月—次年1月开始急剧下降，1月中旬降至最低点，随后在2—4月开始回升至95%左右，之后基本稳定不变。

2.2　中国天山LST时空变化特征

2.2.1　不同月份LST垂直分布格局　通过计算2001—2018年不同月份MODIS 8 d平均LST(白天和夜间LST的平均值)的垂直分布，得到研究区LST的垂直分布格局(图4)。在各海拔带上，春季LST均高于秋季LST。3月与11月LST曲线相近，4月与10月LST曲线相近，5月与9月LST曲线相近，春季和秋季的LST均表现为自高海拔向低海拔逐渐降低。5000 m以下地区的夏季LST均高于0 ℃，不利于积雪积累，故夏季SCP较低。在12月—次年2月(冬季)，A区海拔400 m之后有一段逆温现象，LST由0 ℃开始下降，在海拔200~400 m开始上升，在此期间SCP的变化表现为先升高后降低，由此表明月均LST的垂直分布模式与SCP变化模式具有很强的对应关系。

2.2.2　不同海拔分区LST年内变化态势　图5为2001—2018年不同海拔分区LST的年内变化情况。6个海拔分区的共同特征是最低LST均出现在1月中下旬左右，全年平均LST由夏季末开始下降，冬季过后(1月25日)开始逐步上升，夏季最高LST高达36 ℃左右，冬季最低LST低至-29 ℃左右。在同一时间内，随着海拔的逐渐升高，平均LST也随之降低。中国天山LST的垂直变化模式与SCP的垂直变化模式具有很强的对应关系，随着海拔逐渐升高，各月的LST呈下降趋势，SCP呈上升趋势，说明LST与SCP存在负相关关系。从时间序列上看，2个海拔分区(E区和F区)的SCP曲线变化规律与LST曲线变化规律相似，而4个海拔分区(A、B、C区和D

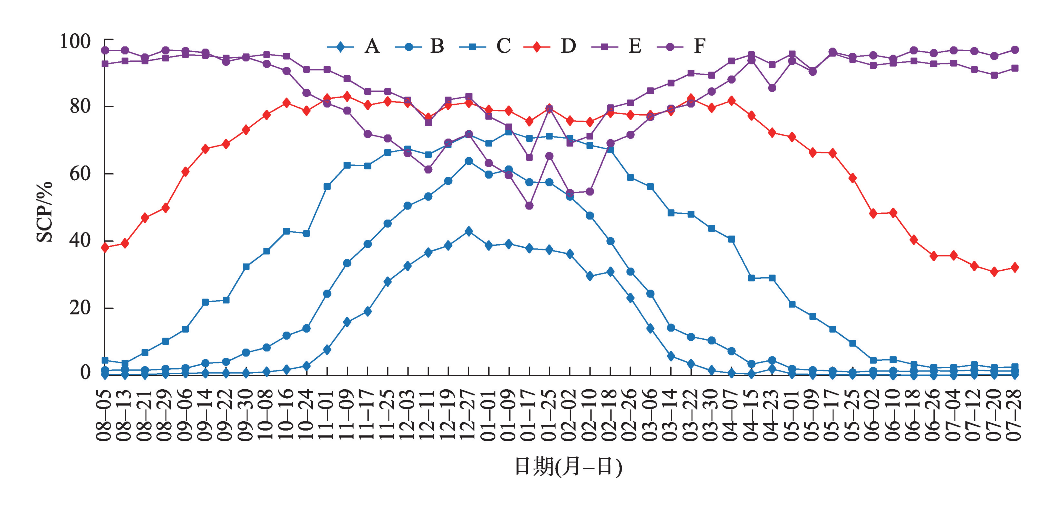


图3　2001—2018年中国天山不同海拔分区SCP年内变化

Fig. 3　Intra-annual changes of SCP in different altitude zones in Chinese Tianshan Mountains from 2001 to 2018

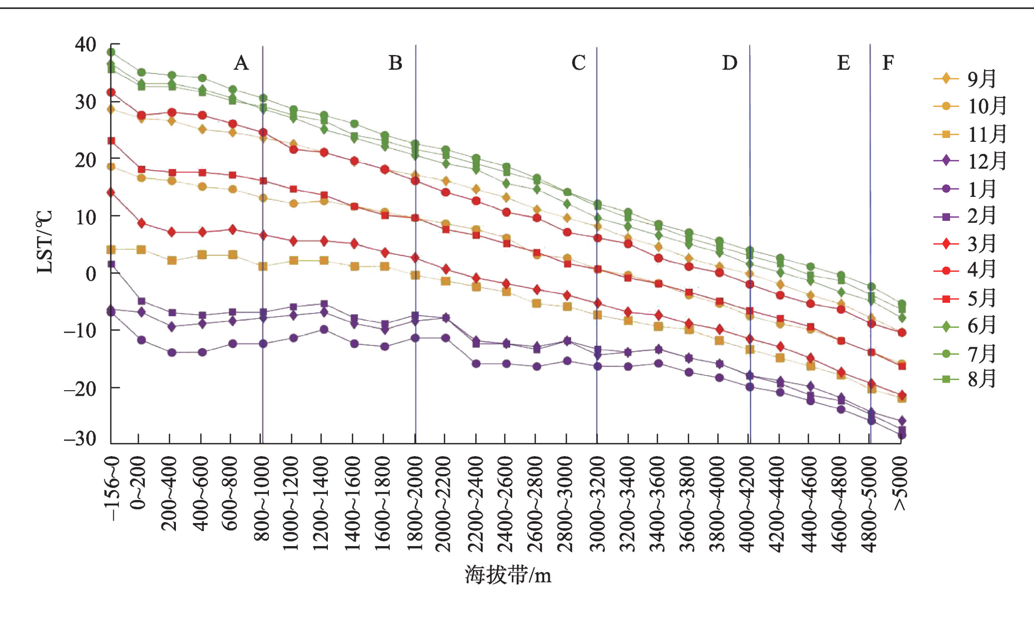


图4 2001—2018年中国天山月均地表温度(LST)垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of monthly mean land surface temperature (LST) in Chinese Tianshan Mountains from 2001 to 2018

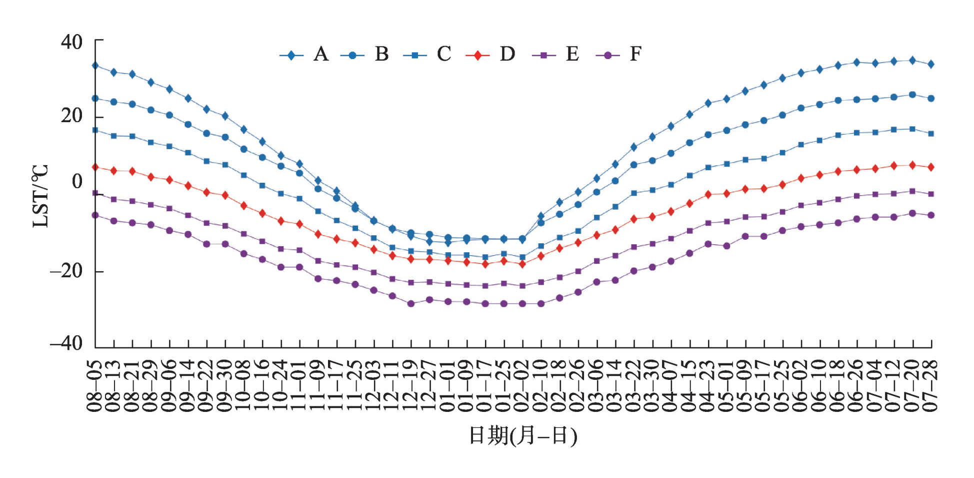


图5 中国天山不同海拔分区LST的年内变化

Fig. 5 Intra-annual changes of LST in different altitude zones in Chinese Tianshan Mountains

区)的SCP曲线变化规律与其对应的LST曲线变化规律呈相反态势,表明中国天山积雪垂直分布存在着海拔异质性。

2.3 SCP与LST相关性分析

对照各月SCP与LST垂直分布的相关分析结果(表3)可得,SCP与LST之间存在显著负相关关系。在3—5月和9—11月,SCP与LST的负相关关系较强(r<-0.9),12月—次年2月负相关关系较弱(r>-0.8)。在4—7月消融期内,4月负相关性较强(-0.96),7月负相关性较弱(-0.84),4—7月内负相关性呈逐月递减趋势。在8—10月积累期内,8月负相关性较弱(-0.87),10月负相关性较强(-0.98),负相关性呈逐月增强趋势。

为进一步探讨SCP变化与LST之间的关系,对2001—2018年5个海拔分区(因海拔高于5000 m以上区域数据稀少,故5000 m以上地区不做考虑)8 d

表3 中国天山各月SCP与月LST的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between monthly SCP and monthly LST in Chinese Tianshan Mountains

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
相关系数	-0.59**	-0.73**	-0.95**	-0.96**	-0.93**	-0.88**	-0.84**	-0.87**	-0.94**	-0.98**	-0.93**	-0.75**

注:*表示在0.05水平上显著;**表示在0.01水平上显著。下同。

表4　2001—2018年中国天山不同海拔分区SCP与LST的相关系数

Tab. 4　Correlation coefficients between SCP and LST in different altitude zones in Chinese Tianshan Mountains from 2001 to 2018

年份	A区	B区	C区	D区	E区
2001	−0.772**	−0.960**	−0.981**	−0.990**	−0.794**
2002	−0.745**	−0.967**	−0.997**	−0.983**	−0.905**
2003	−0.776**	−0.909**	−0.950**	−0.980**	−0.825**
2004	−0.656**	−0.944**	−0.982**	−0.980**	−0.929**
2005	−0.550**	−0.940**	−0.969**	−0.991**	−0.957**
2006	−0.812**	−0.974**	−0.983**	−0.964**	−0.871**
2007	−0.752**	−0.915**	−0.989**	−0.993**	−0.841**
2008	−0.790**	−0.990**	−0.976**	−0.986**	−0.924**
2009	−0.672**	−0.967**	−0.988**	−0.977**	−0.913**
2010	−0.715**	−0.969**	−0.991**	−0.978**	−0.877**
2011	−0.761**	−0.964**	−0.983**	−0.989**	−0.831**
2012	−0.733**	−0.971**	−0.990**	−0.990**	−0.897**
2013	−0.680**	−0.929**	−0.966**	−0.996**	−0.874**
2014	−0.757**	−0.954**	−0.973**	−0.995**	−0.823**
2015	−0.814**	−0.973**	−0.996**	−0.977**	−0.856**
2016	−0.740**	−0.955**	−0.984**	−0.986**	−0.880**
2017	−0.756**	−0.974**	−0.971**	−0.994**	−0.835**
2018	−0.650**	−0.986**	−0.965**	−0.986**	−0.858**
平均值	−0.730**	−0.958**	−0.980**	−0.985**	−0.872**

注：将中国天山划分为6个不同海拔分区：A区（海拔≤1000 m）、B区（海拔1000~2000 m）、C区（海拔2000~3200 m）、D区（海拔3200~4200 m）、E区（海拔4200~5000 m）和F区（海拔≥5000 m）。

SCP与LST进行相关分析。由表4可见，B~D区的SCP与LST均具有显著的强负相关性（r<−0.9），在D区达到最高，在A区最低；SCP与LST的显著相关性随海拔高度的增加先增加后减小。

3　讨 论

中国天山各季节的SCP随海拔增加而增加，均在4800~5000 m海拔带上达到峰值（70%~99%），这与中国天山SCP随着海拔的增加而增加，尤其是在高海拔的永久性积雪区域，SCP均保持在70%以上结论一致[10,24]，但本文还发现在不同的较小海拔范围内，就中国天山SCP峰值而言，夏季大于冬季。唐志光等[23]发现中国天山积雪面积在1月底达到最大值，在7—8月达到最低值，秦艳等[11]和侯小刚等[25]发现整体上中国天山SCP在冬季达到最大、夏季最小，但均未从精细海拔带上探讨SCP的季节变化。本文在更精细的海拔尺度上开展研究，发现积雪与LST垂直变化密切相关。E区和F区2个海拔分区（4200 m以上）的SCP曲线变化规律与LST的曲线变化规律相似，而A、B、C区和D区4个海拔分区（4200 m以下）的SCP曲线变化规律与其对应的LST曲线变化规律呈相反态势，这充分表明中国天山积雪垂直分布存在着海拔异质性。积雪升华和风吹雪的影响是高海拔山区积雪减少的重要因素[26]，尽管该区域全年气温较低，满足积雪的负温条件，但高海拔地区控制积雪面积的决定性条件为降水[27−28]，而冬季高山区降水相比夏季较少，加上中国天山盛行西风环流的风吹雪作用使积雪迁移至河谷或海拔较低的区域，冬季大风和相对干燥的气候进一步加速积雪升华[29]，从而导致4200 m以上区域冬季SCP减少，故该区域的SCP变化规律与4200 m以下区域SCP变化规律呈相反特征。

除冬季外，春、夏、秋3个季节的SCP与LST均有显著强负相关性，冬季相关性较差可能与低海拔地区降雪较多、高海拔地区风吹雪效应和温度反转现象有关[30]。不同海拔带上LST对积雪的影响作用也不同，在海拔3200~4200 m上LST对SCP影响最大，超过4200 m海拔后LST对SCP的影响逐渐减

弱，这是因为在海拔阈值内温度（LST或气温）是影响SCP的主要控制因素[31]，超过海拔阈值，影响SCP空间分布的因素则更为复杂。由于山区观测数据的缺乏，高海拔地区积雪变化的驱动因素辨析仍然具有挑战性，值得进一步研究。此外，18 a的时间序列尚短，研究积雪年际变化可信度尚较低，在统计学上难以通过显著性检验，随着遥感数据不断的积累未来将会针对更长时间序列的积雪产品资料展开更为深入的研究工作。

4 结 论

本文基于2001—2018年MOD10A2积雪产品和MOD11A2地表温度产品，通过对海拔进行精细分带，采用了分区统计和相关性检验方法对中国天山积雪垂直分布异质性进行了详细解析，并对积雪垂直分布与LST的响应关系进行了探讨，得到如下结论：

（1）中国天山SCP随海拔的变化呈春、夏、秋、冬4种季节变化模式。冬季SCP随海拔变化幅度较大，在海拔800 m以下及1200 m以上均呈明显上升趋势，800~1200 m之间呈明显下降趋势。春季与秋季SCP随海拔变化呈相似的变化趋势。夏季SCP在海拔2800 m以上呈明显上升趋势，在4800~5000 m海拔带上达到峰值后迅速下降。每种模式在不同海拔带上呈现不同的特征，4种变化模式中SCP均在海拔带4800~5000 m上达到峰值，且积雪与LST的垂直变化具有显著强负相关关系。

（2）中国天山高海拔地区（E区和F区）的SCP垂直分布与中低海拔地区（A、B、C区和D区）的SCP垂直分布规律呈相反特征，但均表现较为敏感的海拔依赖性。在5—9月，SCP对C区和D区海拔最为敏感，其他4个分区表现不敏感。A、B、E区和F区4个分区的SCP在4—10月基本上无变化，相比较C区和D区而言，变化并不敏感。

（3）从季节尺度上看除冬季外，春、夏、秋3个季节的SCP与LST均有显著强负相关性，从空间尺度上看，在海拔3200~4200 m间LST对SCP影响最大，超过4200 m海拔后LST对SCP的影响逐渐减弱。

参考文献（References）

[1] 易颖, 刘时银, 朱钰, 等. 2002—2018年叶尔羌河流域积雪时空变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 15-26. [Yi Ying, Liu Shiyin, Zhu Yu, et al. Spatiotemporal variation of snow cover in the Yarkant River Basin during 2002—2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 15-26.]

[2] Romanov P, Gutman G, Csiszar I, et al. Automated monitoring of snow cover over North America with multispectral satellite data[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(11): 1866-1880.

[3] 盛光伟, 肖鹏峰, 张学良, 等. 新疆天山及北疆地区积雪反照率差异[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 774-781. [Sheng Guangwei, Xiao Pengfeng, Zhang Xueliang, et al. Difference of snow albedo between Tianshan and northern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 774-781.]

[4] Chen Y, Li W, Deng H, et al. Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 35458, doi: 10.1038/srep39364.

[5] 穆振侠, 姜卉芳. 新疆阿克苏河流域昆马力克河积雪消融规律对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1284-1292. [Mu Zhenxia, Jiang Huifang. Response of snow melting law of Kunmalike River to climate change in Aksu River Basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1284-1292.]

[6] Tang Z G, Wang J, Li H Y, et al. Spatiotemporal changes of snow cover over the Tibetan Plateau based on cloud-removed moderate resolution imaging spectroradiometer fractional snow cover product from 2001 to 2011[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1): 3582, doi: 101117/1.JRS.7.073582.

[7] 除多, 达珍, 拉巴卓玛. 西藏高原积雪覆盖空间分布及地形影响[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 635-645. [Chu Duo, Da Zhen, Laba Zhuoma, et al. Spatial distribution and topographic influence of snow cover in Tibet Plateau[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(5): 635-645.]

[8] 陈文倩, 丁建丽, 马勇刚, 等. 亚洲中部干旱区积雪时空变异遥感分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 11-19. [Chen Wenqian, Ding Jianli, Ma Yonggang, et al. Spatial-temproal variability of snow cover in arid regions of Central Asia[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 11-19.]

[9] 卫仁娟, 彭亮, 梁川, 等. 基于MODIS雪盖数据的叶尔羌河流域积雪再分析[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6): 141-147. [Wei Renjuan, Peng Liang, Liang Chuan, et al. Analysis of snow coverage in Yarkant River Basin based on MODIS snow data[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(6): 141-147.]

[10] 何海迪, 李忠勤, 张明军. 基于MODIS数据中国天山积雪面积时空变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 367-374. [He Haidi, Li Zhongqin, Zhang Mingjun. Spatio-temporal variation analysis of snow cover area of Tianshan Mountains in China using MODIS data[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 367-374.]

[11] 秦艳, 丁建丽, 赵求东, 等. 2001—2015年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 249-260. [Qin Yan, Ding Jianli, Zhao Qiudong, et al. Spatial-temporal variation of snow cover in the Tianshan Mountains from 2001 to

2015, and its relation to temperature and precipitation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 249–260.]

[12] Wan Z. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1): 59–74.

[13] 管延龙, 王让会, 李成, 等. 基于MODIS数据的天山区域地表温度时空特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 681–688. [Guan Yanlong, Wang Ranghui, Li Cheng, et al. Spatial-temporal characteristics of land surface temperature in Tianshan Mountains area based on MODIS data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 681–688.]

[14] 徐永明, 覃志豪, 沈艳. 长江三角洲地区地表温度年内变化规律与气候因子的关系分析[J]. 国土资源遥感, 2010(1): 60–64. [Xu Yongming, Tan Zhihao, Shen Yan. The relationship between interannual variations of land surface temperature and climate factors in the Yangtze River Delta[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2010(1): 60–64.]

[15] 李雪梅, 高培, 李倩, 等. 中国天山积雪对气候变化响应的多通径分析[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(4): 303–312. [Li Xuemei, Gao Pei, Li Qian, et al. Muti-paths impact from climate change on snow cover in Tianshan mountainous area of China[J]. Climate Change Research, 2016, 12(4): 303–312.]

[16] 窦燕, 陈曦, 包安明, 等. 2000—2006年中国天山山区积雪时空分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 28–34. [Dou Yan, Chen Xi, Bao Anming, et al. Study of the temporal and spatial distribute of the snow cover in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 28–34.]

[17] Liu J P, Zhang W, Liu T. Monitoring recent changes in snow cover in Central Asia using improved MODIS snow-cover products[J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(5): 763–777.

[18] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区235 a气候变化及降水趋势预测[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 803–808. [Wei Wenshou, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. Climate change in recent 235 years and trend prediction in Tianshan Mountainous area[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(5): 803–808.]

[19] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725–731.

[20] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 10–29. [Hu Ruji. Physical geography of the Tianshan Mountains in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 10–29.]

[21] 黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 北疆牧区MODIS积雪产品MOD10A1和MOD10A2的精度分析与评价[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 722–729. [Huang Xiaodong, Zhang Xuetong, Li Xia, et al. Accuracy analysis for MODIS snow products of MOD10A1 and MOD10A2 in northern Xinjiang area[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 722–729.]

[22] 马勇刚, 黄粤, 陈曦, 等. 新疆积雪覆盖时空变异分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 483–489. [Ma Yonggang, Huang Yue, Chen Xi, et al. Analyzing spatial-temporal variability of snow cover in Xinjiang[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 483–489.]

[23] 唐志光, 王建, 王欣, 等. 近15年天山地区积雪时空变化遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3): 556–563. [Tang Zhiguang, Wang Jian, Wang Xin, et al. Spatiotemporal variation of snow cover in Tianshan Mountains based on MODIS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(3): 556–563.]

[24] 任艳群, 刘海隆, 包安明, 等. 基于SSM/I和MODIS数据的天山山区积雪深度时空特征分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1178–1187. [Ren Yanqun, Liu Hailong, Bao Anming, et al. Spatial and temporal characteristics of snow depth in the Tianshan Mountains derived from SSM/I and MODIS data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1178–1187.]

[25] 侯小刚, 李帅, 张旭, 等. 基于MODIS积雪产品的中国天山山区积雪时空分布特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(3): 9–16. [Hou Xiaogang, Li Shuai, Zhang Xu, et al. Study on spatial and temporal distribution of snow cover in Tianshan Mountains of China based on daily cloudless snow cover product of MODIS[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(3): 9–16.]

[26] Li H Y, Wang J, Hao X H. Role of blowing snow in snow processes in Qilian mountainous region[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(2): 124–130.

[27] Beniston M. Is snow in the Alps receding or disappearing?[J]. WIREs Climate Change, 2012, 3(4): 349–358.

[28] Morán-Tejeda E, López-Moreno J I, Beniston M. The changing roles of temperature and precipitation on snowpack variability in Switzerland as a function of altitude[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40: 2131–2136.

[29] Pu Z, Xu L, Salomonson V V. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(6): 137–161.

[30] 肉克亚木·艾克木, 玉素甫江·如素力. 伊犁河谷流域积雪分布及其变化分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(6): 157–164. [Aikemu Roukeyamu, Rusuli Yusufujiang. Analysis of snow cover distribution and its changes in the Ili River Valley[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(6): 157–164.]

[31] Bi Y B, Xie H J, Huang C L, et al. Snow cover variations and controlling factors at upper Heihe River Basin, northwestern China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(6): 6741–6762.

Heterogeneity of the vertical distribution of snow cover in Chinese Tianshan Mountains

ZHANG Bo[1,2,3], LI Xuemei[1,2,3], QIN Qiyong[1,2,3], LI Chao[1,2,3], SUN Tianyao[1,2,3]

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Vertical variation of snow cover is important to understand the snow accumulation and decay, especially in topographically complex montane terrains, and was used in snowmelt runoff modeling and assessment of climate change impact on snow cover. On the basis of the snow product of MOD10A2 and land surface temperature (LST) data of MOD11A2 during 2001—2018, this study analyzed the vertical distribution of snow cover and its response to LST in Chinese Tianshan Mountains using zonal statistics and correlation analysis methods. The following results were obtained from the analysis: snow coverage percentage (SCP) showed four different seasonal patterns in spring, summer, autumn, and winter. The SCP in winter changed largely when the altitude rose. The SCP increased and then declined below 1200 m asl and reached the peak at 4000−4200 m. In addition, the SCP in spring and autumn increased gently and fell consistently with change in the altitude, and the peak of SCP was between 4800 and 5000 m asl. The SCP in summer rose significantly above 2800 m asl and reached the peak at 4800−5000 m asl and then fell rapidly. The intra-annual variation in SCP showed significant seasonal characteristics. The vertical distribution of SCP in high-altitude zones (E and F) in Chinese Tianshan Mountains was inverse to that in the middle- to low-altitude zones (A, B, C, and D) from October to April, but both of them were sensitive. The SCP was most sensitive to the relative middle-altitude zones (C and D) from May to September, whereas it was insensitive in the other four zones. The SCP in the A, B, E, and F districts had no change from April to October, and their changes were not sensitive compared with that in the C and D districts. Snow under 4200 m asl or less increased in autumn and winter and decreased in spring and summer, but this tendency was opposite for that above 4200 m asl. A strong negative correlation existed between SCP and LST in spring, summer, and autumn, and the correlation coefficient increased with rising altitude. The poor correlation in winter may be related to more snowfall in low-altitude areas, wind-blown snow effect, and temperature inversion in high-altitude areas. The negative correlation between SCP and LST initially increased and then decreased with the increase in the altitude. LST had the greatest influence on SCP from 3200 to 4200 m, whereas it had the least influence on SCP from 3200 to 4200 m because LST had no altitude gradient effect at altitudes below 1000 m and above 4200 m. Therefore, the negative correlation between SCP and LST in this region was not very strong. This study discussed in detail the vertical distribution of snow cover in Chinese Tianshan Mountains, which had a practical significance for snowmelt runoff in mountainous areas, rational dispatching, and utilization of water resources, combating snow disasters in pastoral areas in winter and flood disasters in spring and summer.

Key words: snow cover percentage; land surface temperature; vertical distribution; Chinese Tianshan Mountains